

# 高压直挂大容量电池储能系统的优化设计

陈强<sup>1</sup>, 李睿<sup>1</sup>, 蔡旭<sup>1,2</sup>

风力发电研究中心, 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240

海洋工程国家重点实验室, 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240

**摘要:** 电池储能因其快速响应、能量密度高等特点, 成为平滑新能源发电输出的重要方式。然而, 随着电池储能系统容量的增加, 高效率、高可靠的功率转换系统(PCS)尤为重要。本文针对高压直挂的大容量电池储能系统进行研究, 首先比较了模块化多电平PCS的拓扑结构, 然后又针对2MW/2MWh的电池储能系统进行了优化设计。最后在实验室搭建了20链节的级联式储能系统实验样机, 验证了高压直挂储能系统的可行性, 为大容量电池储能系统的应用提供了依据。

**关键词:** 电池储能, 模块化多电平变换器, PCS

## Optimal design of massive battery energy storage system connected to high voltage grid without transformer

Chen Qiang<sup>1</sup>, Li Rui<sup>1</sup>, Cai Xu<sup>1,2</sup>

Delta Electronics (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 201209

**Abstract:** Battery energy storage has played an important role in balancing output power of renewable energy because of the fast response, high energy density and so on. However, the high efficiency and high reliability of power conversion system is the most important, especially with larger and larger capacity of battery energy storage system. In this paper, the BESS connected to high voltage grid without transformer has been investigated. First, two topologies of multilevel modular converter has been compared and then the optimal design of a 2MW/2MWh BESS has been finished. At last, a prototype based on cascaded h-bridge converter has been built in laboratory, which verifies the feasibility of BESS without transformer and also provides the basis for future use of massive BESS.

**Keywords:** battery energy storage, multilevel modular converter, power conversion system

## 0 引言

新能源发电蓬勃发展数十年, 已经成为全球电力来源的重要组成部分。然而风能与太阳能属于间歇性能源, 存在输出波动大、预测难、可调节性差等问题, 当接入电网的容量过大时, 会对电网的稳定运行造成影响, 成为新能源发展的瓶颈。为解决该问题, 以储能技术为基础的一系列方案被提出, 用以平滑新能源发电输出, 提高电网稳定性<sup>[1, 2]</sup>。除此之外, 储能技术也可作为削峰填谷、平滑负荷、改善电能质量等的重要手段, 已成电网运行过程中“采 -

发-输-配-用-储”六大环节中的重要组成部分之一。目前, 储能技术已列入《国家“十二五”科学和技术发展规划》, 将成为未来发展的热点。与其它种类的储能技术相比, 电池储能具有响应快、技术成熟、储能密度高、对安装地点无要求等优点。同时由于电池应用广泛, 电池技术一直处于高速发展之中, 低成本、高效率的电池储能系统(Battery energy storage system, BESS)将在未来成为最主要的储能技术之一。

在电池储能系统中, 一般包括电池、功率转换系

统 (power conversion system, PCS)、电池管理系统 (battery management system, BMS) 以及能量管理系统 (energy management system, EMS)。电池是能量载体, 是电池储能系统的核心, 其它部分需要根据电池的参数和特性进行设计与选择; BMS 具有测量与均衡的功能, 是电池可靠长寿命运行的必要条件; PCS 是电池与电网交换能量的关键部件, 高效率高可靠性的 PCS 非常重要; EMS 则是根据电网调度指令、电网状态与电池的荷电状态 (state of charge, SOC) 决定电池充放电功率的控制器。

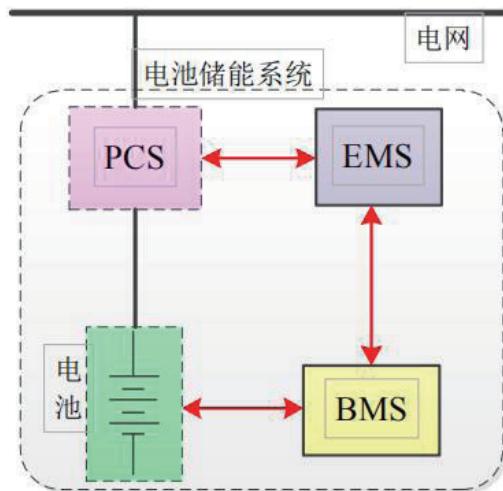


图 1 电池储能系统的基本单元

当前最成熟的电池储能系统依然是低压电池模块与三相两电平或三电平变换器的组合, 然后经工频变压器接入中高压电网。然而, 无论是平滑功率波动, 还是削峰填谷等应用, 都需要大容量的电池储能系统。而随着容量的增大, 一方面电池数量大大增加, 对 BMS 的均衡功能提出了极高的要求; 另一方面 PCS 功率增加, 工频升压变压器增加了系统的成本和体积, 降低了效率和功率密度。多电平变换器具有输出特性好、可冗余、模块化等优点, 目前多用于高压电机驱动及大功率无功补偿等方面<sup>[3]</sup>。将电池储能与多电平变换器相结合, 在电池侧可降低电池电压, 降低电池模块制造的难度, 现有电池技术即可满足大容量需求; 在电网侧, 可提高电能质量, 减小无源滤波器件; 同时还有高效率、高可靠性等优点, 因此基于多电平变换器的大容量电池储能系统具有巨大发展潜力<sup>[4]</sup>。

## 1 大容量 PCS 的评估与比较

PCS 作为储能电池与交流电网的接口, 是实现储能电池模组电网接入和充放电管理的关键设备, 由于储能电池成本较高, 研究高效率、高可靠的电池储能 PCS 具有重要意义。在大容量 BESS 中, PCS 的选择与电池技术的选取有紧密联系, 因此这里结合电池对大容量 PCS 进行评估比较。

早期的大容量 PCS 由于开关器件的限制以及铅酸电池较低的充放电电流倍率和能量密度, 多采用变压器移相多重化逆变技术实现<sup>[5,6]</sup>。目前, 由于电力电子器件的发展, 储能 PCS 的结构主要有单级式和双级式两种结构。单级式 PCS 即电池模块直接与三相两电平或三电平变换器相连, 而双级式 PCS 则是电池模块经双向 DC/DC 变换器再与三相两电平或三电平变换器相连。上述单级或双级式结构的容量一般在 500kW 以下, 大容量 BESS 则由多个单台 PCS 并联组成。由于大容量 BESS 需要接入中高压电网, 现有的储能 PCS 必须依靠工频变压器升压, 而工频升压变压器的存在降低了储能系统的效率, 也增加了系统的成本与体积。

直挂高压电网的变换器拓扑能够省去工频变压器, 为大容量 PCS 提供了另一种解决方案。根据电池模块电压, 可以分为高压电池和低压电池两种情形。高压电池是指电压达到几千伏以上, 能够通过 PCS 直接接入中高压电网的。然而基于电池荷电状态均衡和故障保护等原因, 从成本和安全考虑, 目前工业应用中由电池单体串并联组成的储能电池模组的直流电压一般不超过 1kV。因此, 高压电池方案暂时不具有可能性。

低压电池模块想要通过 PCS 直挂高压电网, 有两个技术路线: 通过高频隔离 DC/DC 变换器升压或模块化多电平变换器进行升压。前者如图 2 所示, 技术难点是大容量双向 DC/DC 变换器, 目前还处于研究阶段。而模块化多电平技术在高压大功率变换器中的应用已经相当成熟, 如无功补偿器、高压电机驱动及高压直流输电等。模块化的技术使得低压电池能够直接使用, 同时也解决了大容量化的问题, 因此多电平技术在大容量 PCS 的应用中具有特殊的优势。

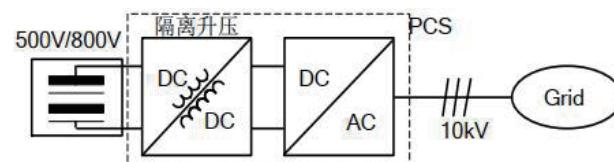


图 2 基于隔离 DC/DC 变换器的电池储能系统

在大容量 PCS 的应用中，主要是两种拓扑即级联 H 桥变换器(CHBC)<sup>[7,8]</sup>和模块化多电平变换器(MMC)<sup>[9,10]</sup>，如图 3 与图 4 所示。子模块是模块化变换器的基础，传统 MMC 用于 HVDC 时，考虑效率优先一般采用半桥拓扑作为子模块；CHBC 用于 SVG 时，考虑模块数少而采用全桥拓扑作为子模块。然而在作为 PCS 时，MMC 高压直流母线不需要输出，因此只需要子模块满足交流侧电压即可。

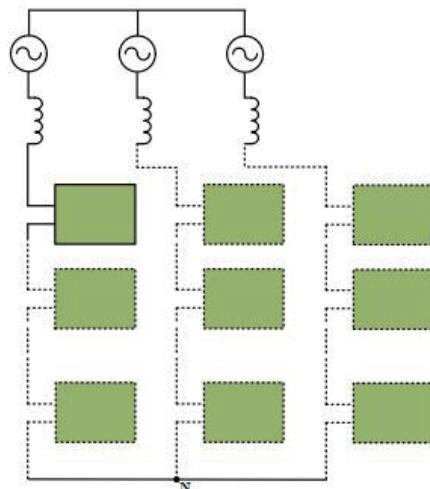


图 3 CHBC

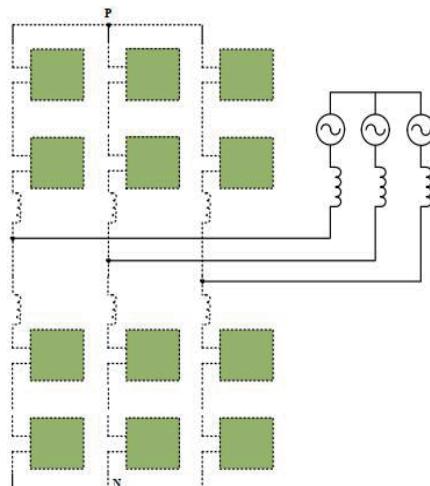


图 4 MMC

无论是 CHBC 还是 MMC，要保证变换器正常工作，当子模块是全桥拓扑时必须满足：

$$\sum_{i=1}^N u_{ci} \geq 110\% U_m$$

其中， $u_{ci}$  是子模块直流侧电压， $N$  是 CHBC 每相子

模块数量，或是 MMC 每相桥臂的子模块数量， $U_m$  则是电网侧相电压的幅值。这里考虑电网电压有 10% 的波动，且 MMC 或 CHBC 均不会过调制。而当子模块是半桥拓扑时必须满足：

$$\frac{\sum_{i=1}^N u_{ci}}{2} \geq 110\% U_m$$

可见，若采用半桥拓扑作为子模块，则在相同电网电压下，模块数加倍，加大了控制难度，但可以增加电池储能的容量。与此类似，MMC 相当于两个 CHBC 并联，模块数加倍，可以增加电池储能的容量。同时 MMC 的功率也更大，但控制也较为复杂，除需要对相间进行均衡外，还要对桥臂间进行均衡。

另外，由于电池模块电压波动较大，电池模块可以直接接入子模块，即单级式 PCS；也可以通过 DC/DC 变换器与子模块相连，即双级式 PCS，如图 5 所示。对于单级式 PCS，子模块电压会随电池模块电压变化而变化，为保证电池模块电压低时 PCS 依然能够正常工作，需要更多的子模块。同时，由于子模块本质上是一个单相变换器，电池模块直流侧将有较大的二次电流谐波。而对于双级式 PCS，由于 DC/DC 变换器的存在，电池模块的电压可以更低，且不同种类的电池接入时影响不大。同时可以通过双向 DC/DC 变换器控制子模块电压保持恒定，并抑制电池侧的二次电流谐波。当然相比单级式 PCS，双级式 PCS 的控制系统更加复杂，且效率要略低。

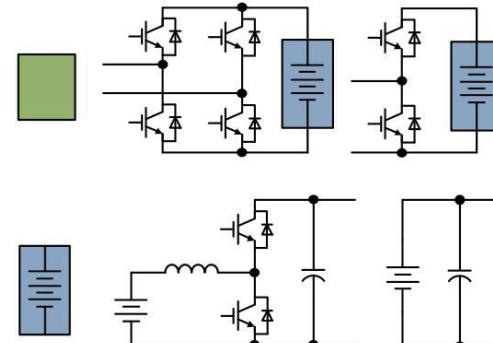


图 5 PCS 子模块示意图

## 2 2MW/2MWh/10kVBESS 的设计

### 2.1 BESS 的配置

针对 2MW/2MWh 的 BESS，首先需要确定电池的类型。钛酸锂电池作为锂离子电池的一种，具有高倍

率、长寿命等特点，已经广泛应用在电动大巴中，可以作为大容量电池储能系统的载体。钛酸锂电池单体参数为2.3V/50Ah，且电池SOC控制在20%-80%间，电池出口电压波动范围1.9V-2.7V，波动率正负17%。21节电池单体串联组成标准电池单元，其标称电压为48.3V，电压的波动范围39.9V-56.7V。

然后确定PCS的拓扑结构，如图5所示，DC/DC变换器选用的是双向buck/boost变换器，取直流电压变比为1:2。当PCS接入10kV时，表1给出了几种PCS拓扑结构所需要的总电池电压、子模块数以及最大电池电流。可以看到，由于系统接入高压电网，电池电流较小，现有钛酸锂电池单体足以满足要求。因此这里选择全桥CHBC拓扑，模块数最少，控制系统最简单，效率也最高；而电池单体为50Ah，能够满足最大充放电电流74A的要求。

表1

拓扑结构	总电池电压	子模块数	电池电流
CHBC+全桥	27kV以上	3N	小于74A
CHBC+全桥+DC/DC	13.5kV	小于3N	158A
CHBC+半桥+DC/DC	54kV以上	6N	小于37A
CHBC+半桥+DC/DC	27kV	小于6N	74A
MMC+全桥	54kV以上	6N	小于37A
MMC+全桥+DC/DC	27kV	小于6N	74A
MMC+半桥	108kV以上	12N	小于19A
MMC+半桥+DC/DC	54kV	小于12N	37A

最后需要根据PCS的效率，并结合电池模块电压确定最优的子模块数量。对于CHBC，其主要损耗即全桥子模块的开关损耗与导通损耗。假设电网侧相电压与电流为：

$$U = U_m \sin(\omega t)$$

$$I = I_m \sin(\omega t - \varphi)$$

CHBC采用载波移相调制策略，同时单个全桥子模块采用单极倍频调制，则可以得到CHBC单个全桥模块的导通损耗即：

$$\begin{aligned} P_{con} = & \frac{2}{\pi} \int_0^\varphi \frac{U_m \sin(\omega t)}{nE} I_m |\sin(\omega t - \varphi)| U_f(I) d\omega t \\ & + \frac{2}{\pi} \int_\varphi^\pi \frac{U_m \sin(\omega t)}{nE} I_m |\sin(\omega t - \varphi)| U_{ce}(I) d\omega t \\ & + \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \left\{ 1 - \frac{U_m \sin(\omega t)}{nE} \right\} I_m |\sin(\omega t - \varphi)| \{ U_{ce}(I) + U_f(I) \} d\omega t \end{aligned}$$

其中， $U_f(I)$ 即二极管导通压降， $U_{ce}(I)$ 即IGBT的导通压降，此数据是一个非线性函数，可以用数值方法在芯片资料中拟合得到。对于单极倍频调制，每个开关周期内全桥模块有四次状态切换，共会产生两次开通损耗，两次关断损耗，两次二极管反向恢复损耗，从而可得全桥模块的开关损耗为：

$$P_{sw} = 2 \sum_{n=0}^{\frac{f_s}{f_0}} (E_{on} [I_m \sin(n\omega T_s - \varphi), E] + E_{off} [I_m \sin(n\omega T_s - \varphi), E] + E_{err} [I_m \sin(n\omega T_s - \varphi), E])$$

其中， $E_{on}$ 、 $E_{off}$ 为IGBT开通和关断的损耗， $E_{err}$ 为二极管的关断损耗。从而可得CHBC的效率：

$$\eta = \frac{3N(P_{sw} + P_{cond})}{P} \times 100\%$$

由于总电池电压约为27kV，为防止电池模块电压过高，考虑子模块数N ∈ [10, 25]。表2给出了不同模块数时，每个模块中电池单元的串联个数、电池模块的最大电压、系统的容量、效率以及冗余链节数。综合各方面选择链节数为20。

表2

BESS配置	电池模块串联数	最大电压	容量	最大效率	冗余链节数
12	23	1304	1	97.78%	2
14	20	1134	1.01	97.74%	2
16	18	1020	1.04	97.69%	3
18	16	907	1.04	97.65%	4
20	14	793	1.01	98.77%	4
22	13	737	1.03	98.72%	4
24	12	680	1.04	98.68%	5

## 2.2 三级均衡系统

大容量电池储能系统需要数以万计的电池单体，这些单体先是通过串并联形成电池单元，然后电池单元串联组成高压电池模块。在高压直挂大容量电池储能系统中采用三级均衡控制，如图6所示，前两级均衡控制在BMS中进行，最后一级则由PCS完成。在电池单元中，筛选一致性较好的单体进行串并联，均衡的电路可较简单且均衡功率非常小，形成第一级均衡，由BMU完成；在电池模块中，电池单元的均衡需要较大的功率，且模块电压较高对均衡电路要求也高，形成第二级均衡，由BCMS完成。BAMS与PCS形成第三级均衡，BAMS将多个BCMS的电池信息进行综合，PCS主控制器则根据SOC信息进行功率控制，由CHBC主电路完成电池模块间的SOC均衡。

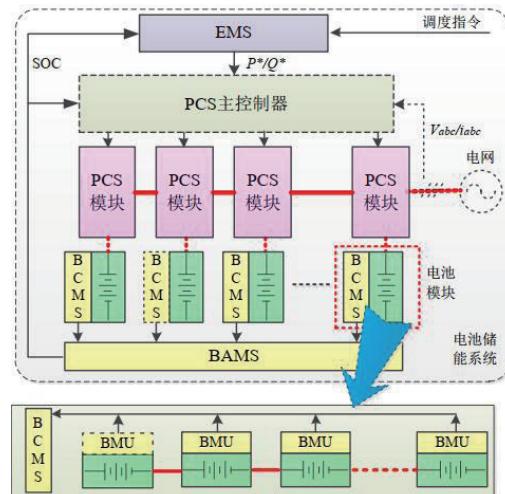


图 6 高压直挂储能系统的示意图

### 3 控制系统设计

高压直挂大容量储能系统比较复杂，图 6 给出了其基本结构示意图。其中，EMS 与 PCS 主控是控制系统的核 心部分。EMS 接受电网的调度指令，同时根据 BMS 得到电池状态，并根据所处工作模式计算得出 PCS 对电池的充放电功率。PCS 根据 EMS 的功率指令进行功率控制，同时根据 BMS 所给出的 SOC 对各电池模块进行均衡控制。

#### 3.1 EMS 的控制策略

**无功功率支撑：**参与电网电压调节，但由于整体功率仍相对较小，因此无功指令由电网调度下发。

**削峰填谷：**对区域负荷进行短期预测，并根据预测结果对负荷曲线进行平滑。

**系统调频：**通过检测高压变电站侧的频率，改变 PCS 与电网交互的功率，从而完成系统调频。

**孤岛运行：**EMS 检测到储能系统处于孤岛运行时，向 PCS 发送孤岛运行指令，由 PCS 控制区域电网的电压及频率，为大电网恢复提供准备。

**SOC 控制：**若孤岛运行的功能使能时，储能系统的 SOC 必须预留部分，以备紧急时刻使用。

#### 3.2 PCS 的控制策略

为保证高压直挂储能系统的高可靠性，故障控制必不可少。作为多模块化变换器，需要同时考虑模块故障以及电网侧故障，并在这两种情况下仍然能够控制储能系统的输出功率以及保证电池模块的 SOC 均衡。由于 SOC 均

衡本质上也是有功功率控制，一种统一控制策略用来简化 PCS 的多目标控制<sup>[12]</sup>，其控制框图如图 7 所示。

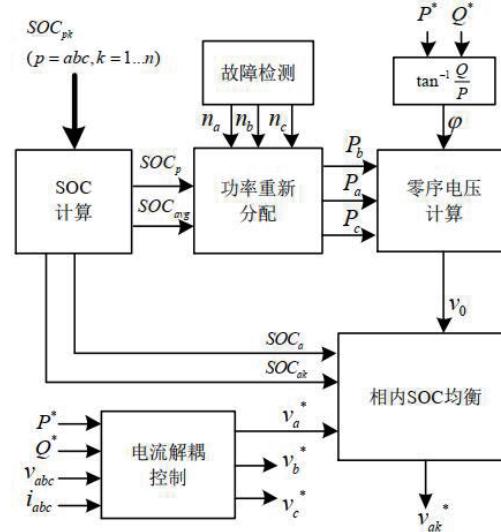


图 7 PCS 的控制策略

首先，PCS 通过解耦电流控制策略实现对有功功率和无功功率的控制。当电网电压不平衡，控制正负序电流，保证各相输出功率相等。其次，控制器根据各电池模块的 SOC 计算各相及平均 SOC，然后再根据每一相的故障模块数、SOC 以及电网电压不平衡情况，重新分配每一相的功率，并由零序电压实现。再次，相内均衡则是根据 SOC 的大小，通过排序或改变功率模块输出电压的方式来实现功率调节，从而完成相内 SOC 均衡。

### 4 试验样机

为了对 CHBC 拓扑的储能方案以及 PCS 的控制策略进行验证，在实验室搭建了 20 链节的试验样机，其主要参数如表 3 所示。电池采用钛酸锂电池，单个电池模块为 24/10Ah，可长时 3C 充放电。低压相机每相有 20 个功率模块，每个功率模块直流侧接一个电池模块，同时采用载波移相调制，其等效开关频率为 40kHz。

表 3 低压样机主要参数

额定电压	220V
额定功率	40kW
级联数	20
开关频率	1kHz
网侧电感	0.5mH
电池模块	24V/10Ah

图8给出了PCS从待机到额定功率的启动过程，可以看出PCS的功率响应小于10ms。图9给出了PCS额定功率充电到放电的切换过程，可以看出整个过程小于12ms。图10给出了PCS对电网低电压跌落的响应，整个跌落过程中PCS维持跌落前功率输出，但受PCS最大输出电流限制。图11给出了电网不对称时的电压电流波形，可以看到PCS可以控制输出电流没有负序。

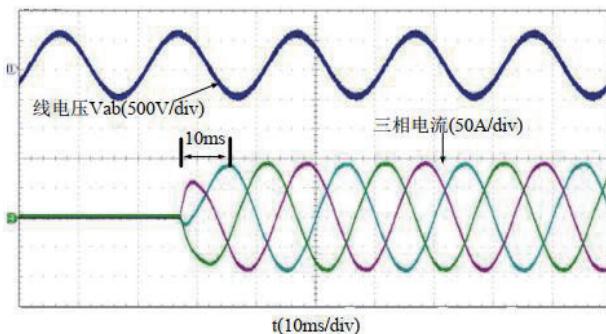


图8 PCS额定功率启动的电网电压电流波形

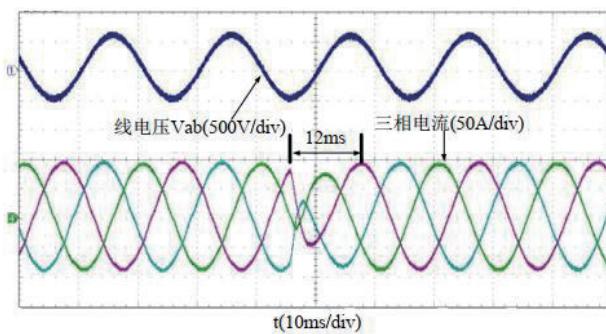


图9 额定功率充放电切换时电网电压电流波形

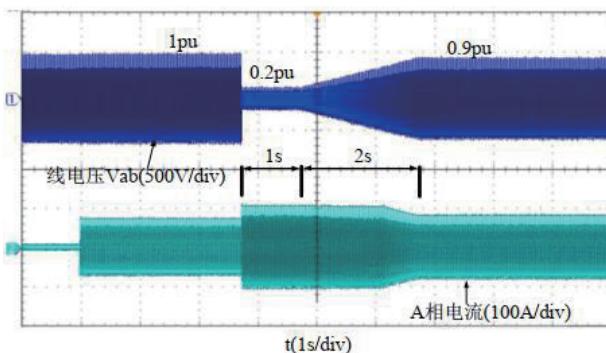


图10 低电压穿越电网电压电流波形

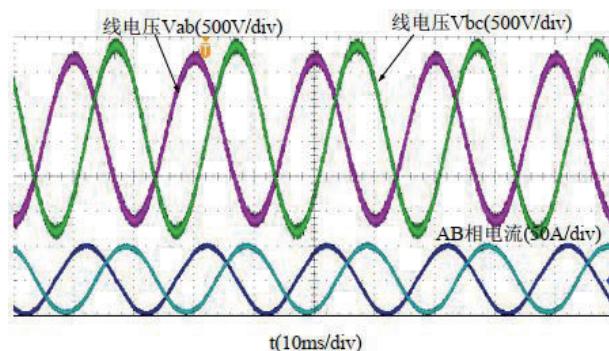


图11 电网不对称时电网电压电流波形

## 5 结论

高压直挂电池储能系统以其高效率、高可靠性成为大容量电池储能系统的首选方案。本文首先比较了CHBC与MMC两种模块化多电平变换器作为PCS的优劣，然后对实际2MW/2MWh的电池储能系统进行了优化设计，并对其控制策略进行了讨论。随后，在实验室建立了20链节的低压样机，对CHBC电池储能系统的进行了验证。同时，直挂10kV的2MW/2MWh电池储能系统在深圳宝清储能站运行，成功地证明了高压直挂电池储能方案的可行性，为未来大容量电池储能系统的研制与设计提供了依据。

## 参考文献

- [1] B.-h. ZHANG, J. ZENG, C.-x. MAO, Y.-j. JIN, and Y.-l. WANG, "Improvement of Power Quality and Stability of Wind Farms Connected to Power Grid by Battery Energy Storage System [J]," *Power system technology*, vol. 15, p. 013, 2006.
- [2] Z. Jie, Z. Buhan, M. Chengxiong, and W. Yunling, "Use of Battery Energy Storage System to Improve the Power Quality and Stability of Wind Farms," in *Power System Technology*, 2006. PowerCon 2006. International Conference on, 2006, pp. 1-6.
- [3] H. Akagi, S. Inoue, and T. Yoshii, "Control and performance of a transformerless cascade PWM STATCOM

下转168页